

Une technique ultrasonore pour la supervision des canaux d'irrigation ouverts

Ultrasonic technique applied to flow measurements in open channel irrigation

El Mostafa Ziani, Mustapha Bennouna et Raymond Boissier

Volume 20, numéro 3, 2007

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/016503ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/016503ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Ziani, E. M., Bennouna, M. & Boissier, R. (2007). Une technique ultrasonore pour la supervision des canaux d'irrigation ouverts. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 20(3), 287–297. <https://doi.org/10.7202/016503ar>

Résumé de l'article

Cet article présente un débitmètre à ultrasons conçu en tant que capteur intelligent pour la mesure des écoulements en surface libre ou en conduites fermées. Ce type de débitmètre peut être utilisé pour des applications industrielles ou de gestion de l'eau. Il répond à la forte demande des autorités de supervision des ressources en eau dans les régions semi-arides d'agriculture irriguée. Un état de l'art et les principes généraux des mesures de débits de liquide par ultrasons sont donnés. Le débitmètre original proposé utilise le principe de la mesure des délais entre les impulsions envoyées vers l'amont et vers l'aval dans le fluide. L'approche repose sur la mesure de la différence du temps de transit des ondes acoustiques sur une ou plusieurs cordes de mesure, réparties sur un intervalle suffisant, de manière à assurer la précision requise. Cette méthode permet une véritable intégration du profil des vitesses, ce qui assure une meilleure précision. La vitesse du son dans le fluide est éliminée des calculs grâce à l'utilisation des temps de transmission réciproques. Les calculs de débit sont assurés par un micro-contrôleur. Les calculs théoriques et les technologies proposées ont donné lieu à la réalisation d'un prototype expérimental. Une première application de ce débitmètre à ultrason est réalisée en laboratoire en conduite fermée dans une installation d'essai comportant une seule paire de transducteurs à ultrason. Une seconde application expérimentale est menée sur un banc d'essai comprenant un canal artificiel de forme trapézoïdale de dimensions géométriques bien déterminées avec une pente variable. Ces tests ont permis de vérifier la précision de l'appareil et de valider les techniques et les principes mis en oeuvre dans la conception du débitmètre.

UNE TECHNIQUE ULTRASONORE POUR LA SUPERVISION DES CANAUX D'IRRIGATION OUVERTS

Ultrasonic technique applied to flow measurements in open channel irrigation

EL MOSTAFA ZIANI^a, MUSTAPHA BENNOUNA^b, RAYMOND BOISSIER^c

^aLaboratoire d'Électronique et Systèmes, Faculté des Sciences, BP 473, Oujda, Maroc

^bUniversité Abdelmalek Essaâdi, BP 211, Martil Tétouan, Maroc

^cGroupe de Recherche en Production Intégrée, Université Paris 13, IUT de Saint Denis, 93206 Saint-Denis Cedex 1, France

Reçu le 22 octobre 2003, accepté le 21 novembre 2006

RÉSUMÉ

Cet article présente un débitmètre à ultrasons conçu en tant que capteur intelligent pour la mesure des écoulements en surface libre ou en conduites fermées. Ce type de débitmètre peut être utilisé pour des applications industrielles ou de gestion de l'eau. Il répond à la forte demande des autorités de supervision des ressources en eau dans les régions semi-arides d'agriculture irriguée. Un état de l'art et les principes généraux des mesures de débits de liquide par ultrasons sont donnés. Le débitmètre original proposé utilise le principe de la mesure des délais entre les impulsions envoyées vers l'amont et vers l'aval dans le fluide. L'approche repose sur la mesure de la différence du temps de transit des ondes acoustiques sur une ou plusieurs cordes de mesure, réparties sur un intervalle suffisant, de manière à assurer la précision requise. Cette méthode permet une véritable intégration du profil des vitesses, ce qui assure une meilleure précision. La vitesse du son dans le fluide est éliminée des calculs grâce à l'utilisation des temps de transmission réciproques. Les calculs de débit sont assurés par un micro-contrôleur. Les calculs théoriques et les technologies proposées ont donné lieu à la réalisation d'un prototype expérimental. Une première application de ce débitmètre à ultrason est réalisée en laboratoire en conduite fermée dans une installation d'essai comportant une seule paire de transducteurs à ultrason. Une seconde application expérimentale est menée sur un banc d'essai comprenant un canal artificiel de forme trapézoïdale

de dimensions géométriques bien déterminées avec une pente variable. Ces tests ont permis de vérifier la précision de l'appareil et de valider les techniques et les principes mis en œuvre dans la conception du débitmètre.

MOTS-CLÉS : *Modèles d'écoulement; Mesure de débit à ultrason; Irrigation; Gestion des ressources en eau; Capteur intelligent.*

ABSTRACT

Measuring fluid flow is one of the most important measurements in the industrial fields of process control and water management. In fact, it may well be the most frequently measured process variable. Other measurements are water temperature, pressure and level. There are two types of ultrasonic flow meters used for discharge measurement: the Transit Time and Doppler flow meters. The first type is widely applied to fluid flows in pipes and open channels and is sensitive to suspended solids or air bubbles in the fluid. The second type is more popular and less expensive, but is not considered as accurate as the transit time flow meter. In this work, the Transit Time flow meter is discussed and applied, for the first time, to discharge measurements in pressurized conduits in a laboratory setting, and to open channel irrigation.

We used the Transit Time method, which is based on the dependence of the velocity of an ultrasonic signal in a given medium on the velocity at which this medium is itself flowing. Therefore, pressure disturbances of small magnitude are propagated through a fluid at velocity that is the sound velocity relative to the fluid. If the fluid also has a velocity, the absolute velocity of the pressure disturbance propagation is the algebraic sum of the two. This ultrasonic method uses measurements of the transit time of high frequency energy pulses between one or more pairs of transducers to determine the flow rate of the liquid. The relationship between the measured transit time of an ultrasonic pulse and the average velocity along the pulse path is well described in this paper.

This paper presents the state of the art of the general principle of liquid flow measurements by ultrasonic methods and the problems associated with such measurements. Using the ultrasonic transit time approach, we designed an ultrasonic flow meter according to a smart sensors concept, for the measurement of irrigation water flowing through pipelines or open channels. The new flow meter works on the principle of measuring time delay differences between sound pulses transmitted upstream and downstream in the flowing liquid. The speed of sound in the flowing medium is eliminated as a variable because the flow rate calculations are based on the reciprocals of the transmission times. The transit time difference is digitally measured by means of suitable microprocessor controlled logic.

We initially carried out experimental tests in closed conduits. The installation consisted of three tanks (storage tank, volumetric tank or etalon tank, and supply tank), a pipeline with the primary intelligent flow meter devices being tested, an ultrasonic level-meter and a volumetric flow meter for calibration. The secondary devices included a pump, valves for controlling the apparatus and a level gauge. This apparatus enabled the calibration of flow meters for various volumetric flows. The data can be gathered with a fixed sampling time and are stored and/or transmitted to the computer system, which enables not only data storage, but also the calculation of the time of measurement at a specified level of accuracy and volumetric flow rate.

The laboratory experiment was carried out to facilitate hydraulic studies with a flow rate ranging from 1.25 L/s to 50 L/s. The steel pipeline had a diameter of 100 mm. The flow rate is calculated and the characteristics of calibrated flow meter are plotted. The report from each measurement is shown on the monitor and may be printed. The flow meter is connected to a straight section of pipe that is run at least 15 pipe diameters upstream of the sensor without obstructions, and a minimum of 10 pipes diameters downstream without obstructions (locating a flow meter too close to a flow disturbance may cause a systematic error).

In addition to laboratory tests, the flow meter has also been evaluated in open channels.

Open channel flow is defined as flow in any channel where the liquid flows on a free surface, is not under pressure, gravity is the only force causing the flow and a continuous and progressive decline in water surface elevation occurs as the flow moves downstream. Examples of open channel flows are rivers, streams, creeks, and other uncovered conduits.

Open channel flow measurement is used in many applications: water supply networks, allocation of water for irrigation and agriculture, sewage treatment plants, etc. The discharge measurements in open channels may be computed by means of a rating curve, which is used to convert records of water level readings into flow rates. Because many phenomena can cause the rating curve to change, it must be checked periodically. In this context, the ultrasonic transit time technique is extremely useful in water management. By means of this technique, the flow rate is determined using single and multipath configurations. However, special attention must be paid to define the vertical velocity distribution and the suitable integration method.

The experiment was conducted in liquid (water) using a single path with two transducers (i.e., the velocity profile is sampled along a single line only), and a double path with four transducers; the liquid velocity was varied from 0.075 m/s to 2.4 m/s. The channel has a trapezoidal form (length: 4.2 m, width: 0.45 m, depth varying from 0.05 to 0.38 m) with channel slopes manually adjusted from 0.001 to 0.02, so as to produce variable flows.

In conclusion, the ultrasonic flow meters have the potential to significantly reduce the installation and operating costs of meter stations while providing accuracy levels consistent with, or better than, other traditional metering methods (vortex shedding, differential pressure, orifices, nozzles and venturi meters, Pitot-static-flow meters, magnetic flux, etc.). There may also be a substantial reduction in maintenance cost as the device utilizes digital measurement techniques and provides a wealth of diagnostic information on the status of the electronic measurement system.

The suggested ultrasonic flow meter designed according to a smart sensor concept constitutes a necessary link for the optimal water resources management of an irrigation system. It can be used with confidence and offers an economical and accurate means of measuring the flow of water in open channels. Typical uncertainties are of the order of 2% for single path and 1% for two paths and are attainable with careful application. In closed conduits, the results of the experiments demonstrate the validity and the performance of the laboratory ultrasonic flow meters. The application of the flow meters

under favourable conditions produces a relative error that does not exceed 1%. This preliminary result shows the usefulness of these ultrasonic flow meters. Further investigations, however, are still needed in order to determine the overall performances of this instrument in terms of repeatability, linearity, reliability, and response time.

KEYWORDS: *Liquid flow models; Ultrasonic Transit Time Flow meters; Open channel irrigation; Water management; Intelligent Sensor.*

1. INTRODUCTION

Depuis quelques décennies, on a assisté à une diversification remarquable des techniques d'irrigation utilisables par l'homme pour remédier à ce redoutable fléau que constitue la sécheresse, notamment en Afrique du Nord et au Moyen-Orient.

Dans ce contexte, la gestion de l'eau est devenue un domaine où la recherche se trouve confrontée à des enjeux multiples et pressants. La croissance démographique impose des pressions importantes sur la ressource en eau et l'agriculture irriguée se classe comme le premier consommateur sur la planète. Ces contraintes ont servi de révélateurs à une prise de conscience collective vis-à-vis des dangers qui guettent l'eau et de l'importance de cet élément vital pour le développement socio-économique des collectivités locales.

Une grande partie des terres agricoles du Nord-Orient du Maroc se trouve dans la plaine des Triffa, une zone semi-aride où l'activité agricole est entièrement dépendante de l'irrigation. Un gigantesque système de canaux gravitaires et conduits prélève de l'eau de l'oued Moulouya, dont la régulation des eaux est assurée par le complexe hydraulique Mohamed V – Mechraâ Hammadi.

Un opérateur régional (le gestionnaire public ORMVAM) est responsable de l'allocation de l'eau (planification), de la régulation hydraulique (gestion) et de la police des eaux (contrôle et résolution des conflits). En cas de pénurie d'eau, l'opérateur prend un certain nombre de mesures et d'actions en matière de gestion des ressources en eau et de sensibilisation des agriculteurs face aux aléas climatiques; il incite à l'utilisation de techniques modernes d'irrigation, économes en eau.

L'eau est allouée aux usagers selon un programme d'irrigation fonction de la superficie des cultures et de leur nature. Tout prélèvement illégal d'eau par un agriculteur induit une réduction du débit dans le canal et a un impact sur l'eau reçue par les usagers situés en aval du point d'intervention. Dans cette optique, l'ORMVAM a jugé bon de mettre en place des systèmes de contrôle de débit, répartis le long des différents canaux d'alimentation en eau. Cet objectif vise une utilisation rationnelle de l'eau d'irrigation par une diminution des pertes dans le réseau hydraulique.

Dans ce travail, nous avons tenu à apporter une contribution à la gestion des ressources en eau d'un réseau d'irrigation agricole, en nous intéressant à l'étude et au développement d'une instrumentation performante permettant de fournir les informations utiles sur l'état réel du système d'irrigation. La technique employée pour effectuer cette mesure utilise les ultrasons, eu égard aux nombreux avantages qu'ils procurent.

Nous nous sommes intéressés plus spécifiquement à la mesure de débit transitant dans les systèmes hydrauliques à surface libre (canaux d'irrigation) qui sont des systèmes distribués non linéaires fortement perturbés.

L'article est organisé comme suit : tout d'abord, nous avons présenté le concept de capteur intelligent considéré comme le cœur de notre débitmètre. Ensuite, une attention particulière est portée sur la technique du temps de transit des ondes ultrasonores afin d'évaluer la vitesse d'écoulement de l'eau dans le canal. En fait, dans le cas des canaux, les caractéristiques géométriques sont bien maîtrisées, et il est donc possible d'obtenir facilement le débit. Dans le cas où les conditions hydrauliques sont complexes, la loi Niveau-Débit exploite mal le profil réel des vitesses d'écoulement, des mesures des niveaux et des vitesses sont alors indispensables. Dans ce cas, nous avons proposé une solution basée sur l'exploitation du profil des vitesses en effectuant la mesure réelle de la vitesse existant en différents points de la veine liquide.

Nous avons élaboré et mis en œuvre un procédé original de mesure de vitesses d'écoulement, capable d'assurer une meilleure précision. Le débitmètre est capable de détecter, de mesurer, de traiter localement les données collectées et de les communiquer pour servir à la conduite du système d'irrigation dans lequel il sera intégré.

Les premiers résultats expérimentaux sont exposés à la fin de l'article. Les mesures obtenues, à l'aide du débitmètre ultrasonique que nous avons réalisé, sont comparées à celles fournies par d'autres débitmètres étalons qualifiés de précision installés sur le banc d'essais.

2. PRINCIPES ET TECHNIQUES DES MESURES DE DÉBITS PAR TEMPS DE TRANSIT D'ULTRASONS

Au même titre que les températures, les pressions, les niveaux, les débits de fluides sont un des mesurands très importants dans de vastes domaines tels que la conduite des industries de procédés ou la supervision des systèmes d'adduction d'eau. Les débitmètres à ultrasons présentent, par rapport aux autres techniques, l'intérêt d'une absence de parties mécaniques sujettes à vieillissement et d'une interaction négligeable avec le milieu.

Il existe deux catégories de débitmètres à ultrasons pour la mesure des débits, celle basée sur la mesure de temps de transit et celle basée sur l'effet Doppler. La première catégorie est largement utilisée pour les mesures d'écoulement dans des canaux ouverts ou dans des conduits fermés, les débitmètres sont sensibles à la présence de solides en suspension ou à la présence de bulles dans le fluide, la seconde catégorie est plus répandue et moins chère, toutefois les débitmètres sont considérés comme nettement moins précis. Dans ce travail, on étudiera la conception d'un débitmètre à temps de transit et son expérimentation au sein un banc d'essai destiné aux mesures de débit dans des conduits sous pression et dans des canaux d'irrigation ouverts.

2.1 Les principes opérationnels de l'approche ultrasonique

La méthode du Temps de Transit est fondée sur l'influence de la vitesse propre du milieu sur la célérité d'un signal ultrasonore qui le traverse. En effet, des perturbations de pression de faible amplitude se propagent dans un fluide à une vitesse qui est la vitesse de propagation acoustique dans ce milieu. Si, de plus, ce milieu a une vitesse propre, la vitesse de propagation de la perturbation, par rapport à un repère immobile, est la somme algébrique de la vitesse acoustique et de la vitesse du milieu. La méthode de mesure de la vitesse d'écoulement d'un liquide ou d'un gaz consiste alors à mesurer le temps de transit d'impulsions à haute fréquence entre une ou plusieurs paires de transducteurs ultrasonores. La relation entre la mesure du temps de transit de l'impulsion ultrasonore et la vitesse moyenne le long du chemin suivi par l'impulsion a été décrite en détail par divers auteurs comme FREUND et WARNER (1995), DRENTHE (1995), VAN DELLEN (1996) et l'AMERICAN GAS ASSOCIATION (1996).

Dans LYNNWORTH (1989), le transducteur émet des impulsions ultrasonores alternativement vers l'amont et vers l'aval. Le temps de transit du signal se propageant dans la direction de l'écoulement, T_{BA} :

$$T_{BA} = \int \frac{dl}{C + V \cdot e} = \frac{L}{C + V \cos \theta} \quad (1)$$

est plus court que le temps de transit du signal se propageant en sens inverse, T_{AB} :

$$T_{AB} = \int \frac{dl}{C - V \cdot e} = \frac{L}{C - V \cos \theta} \quad (2)$$

où V est la vitesse du milieu, C la célérité du son dans ce milieu, L la longueur du parcours de l'impulsion, e le vecteur unitaire tangent au chemin de l'onde ou le chemin de l'onde, θ l'angle entre le chemin du son et l'axe du conduit. La valeur de θ n'est pas critique mais doit être connue, elle est généralement prise dans un intervalle de 30 à 60 degrés. Des circuits électroniques associés aux capteurs à ultrason mesurent la différence de temps de transit de l'onde. Si le milieu est immobile, les deux temps amont et aval sont identiques, leur différence est nulle et le débitmètre indique zéro. La vitesse du fluide est proportionnelle à la différence des inverses des temps de transit et peut être exprimée comme :

$$V = \frac{L}{2 \cos \theta} \frac{\Delta T}{T_{AB} \cdot T_{BA}} ; \quad T = T_{AB} - T_{BA} \quad (3)$$

Dans la méthode des transducteurs accolés « clamp-on transducers » mentionnée par GENTHE et YAMAMOTO (1974), puis par DROST (1980) et HILL (2000), les deux transducteurs sont fixés sur la surface extérieure du tube, l'onde ultrasonique est transmise à travers la paroi du tube puis se propage dans le fluide dans des directions obliques par rapport à son axe.

La célérité C_f dans le fluide s'exprime en fonction de l'angle α de l'onde par rapport au transducteur, de la célérité C_t dans le transducteur et de l'angle θ du chemin de l'onde par rapport au fluide et est donnée par :

$$C_f = C_t \cdot \frac{\cos \theta}{\cos \alpha} \quad (4)$$

La distance L est reliée au temps de transit par $L = C_f \cdot T_f$ et l'angle α est relié aux longueurs a et h par $\cos \alpha = a/h$, l'équation du débit Q est alors :

$$Q = A \cdot \left(C_t \cdot \frac{h}{2a} \right) \cdot \left(\frac{\Delta T}{T_f} \right) \quad (5)$$

Cette relation est utile quand la dimension L du conduit n'est pas connue avec certitude.

2.2 Influence des composantes transversales des vitesses d'écoulement le long des deux chemins croisés entre transducteurs.

On considère l'installation de la figure 1 qui comporte deux chemins croisés entre transducteurs.

En un point, la vitesse d'écoulement possède trois composantes : V_x axiale et (V_y, V_z) transversales. On peut ignorer la composante V_z , elle est en effet perpendiculaire au plan des chemins des ondes et elle n'affecte pas les temps de transmission.

Les temps de transit peuvent s'écrire :

$$T_{AB} = \frac{L}{C_f - \langle V_x \rangle \cos \alpha - \langle V_y \rangle \cos \beta} \text{ et } T_{BA} = \frac{L}{C_f + \langle V_x \rangle \cos \alpha + \langle V_y \rangle \cos \beta} \quad (6)$$

d'où :

$$\langle V_x \rangle = \frac{L}{2 \cos \alpha} \frac{\Delta T}{T_{AB} \cdot T_{BA}} - \langle V_y \rangle \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \quad (7)$$

et la vitesse le long de la corde AB est :

$$\langle V_{AB} \rangle = \frac{L}{2 \cos \alpha} \frac{\Delta T}{T_{AB} \cdot T_{BA}} = \langle V_x \rangle + \langle V_y \rangle \frac{D}{L \cos \alpha} \quad (8)$$

tandis que la vitesse le long de la corde CD est :

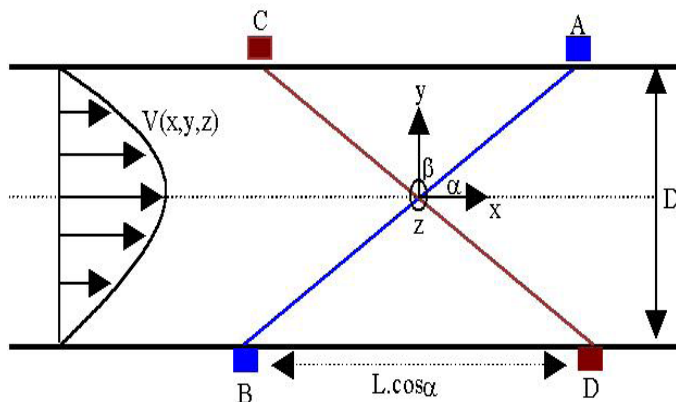


Figure 1. Géométrie de l'installation avec deux transducteurs à chemins croisés.
Schematic of the geometry and set-up of two crossed-path transducers.

$$\langle V_{CD} \rangle = \langle V_x \rangle - \langle V_y \rangle \frac{D}{L \cos \alpha} \quad (9)$$

Il existe donc une différence dans les vitesses de propagation :

$$\langle V_{AB} \rangle - \langle V_{CD} \rangle = 2 \cdot \langle V_y \rangle \cdot \frac{D}{L \cos \alpha} \quad (10)$$

due à la composante transversale $\langle V_y \rangle$ de la vitesse du milieu.

3. CONCEPTION TECHNIQUE ET ÉVALUATION EN LABORATOIRE DU DÉBITMÈTRE ULTRASONORE.

Il est bien connu en technique de mesurage, comme le souligne par exemple BARMTTLER (1992), que, si les signaux sont échantillonnés de nombreuses fois, la résolution augmente avec le nombre d'échantillons. Ce principe est appliqué en effectuant un traitement répétitif des signaux de temps de transit. On utilise deux compteurs, le premier N_t est synchronisé durant la phase de mesure par un oscillateur à quartz de fréquence stable, le deuxième compteur compte le nombre N_s d'échantillons acquis. La mesure complète dure quelques millisecondes. Les deux nombres N_t et N_s sont utilisés pour calculer le temps de propagation de l'impulsion ultrasonore, proportionnel au rapport N_t / N_s . Le schéma fonctionnel de la figure 2 montre l'agencement de l'électronique rapide pour l'exploitation du débit-mètre.

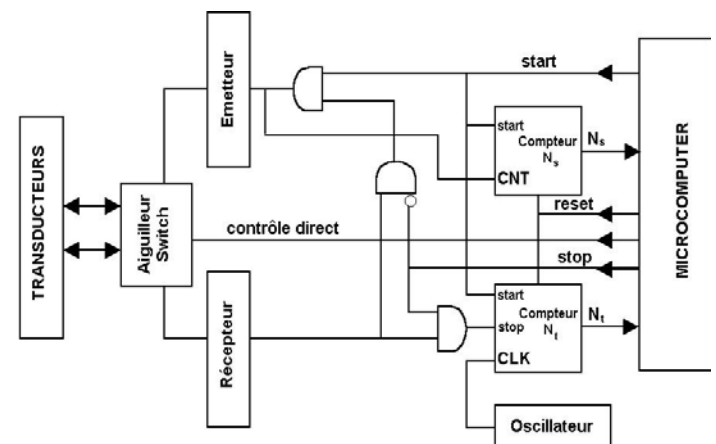


Figure 2. Schéma-bloc de l'électronique du débitmètre ultrasonore.
Block diagram of the transit time ultrasonic flow meter electronics.

3.1 Débitmétrie en canal ouvert et mesure de niveau de surface.

3.1.1 Expérimentation sur canal à surface libre.

À côté des tests en laboratoire, le débitmètre a été évalué sur canaux ouverts. Les mesures de débits dans les canaux ouverts peuvent être obtenues par le biais de courbes de correspondance utilisées pour convertir en débit des mesures de niveau d'eau. De nombreux phénomènes peuvent modifier une courbe de correspondance, et elle doit être réévaluée périodiquement.

Dans ce contexte, la technique de mesure du temps de transit ultrasonore est très intéressante pour la gestion de l'eau. Grâce à cette technique, le débit peut être mesuré en utilisant des configurations à un ou plusieurs chemins en faisant particulièrement attention à définir la distribution verticale des vitesses et une méthode adaptée d'intégration.

L'expérience a été conduite dans un canal d'eau de section trapézoïdale, de longueur 4,2 m, de largeur 0,45 m et de profondeur variant de 0,05 à 0,38 m, avec une pente variable de 0,001 à 0,020 permettant d'ajuster le débit. On a fait varier la vitesse du liquide de 0,075 m/s à 2,4 m/s. Les mesures de temps de transit ont utilisé la technique avec un chemin unique avec deux transducteurs (le profil de vitesse est alors échantillonné le long d'une corde unique) et la technique à double chemin et quatre transducteurs (Figure 3).

La figure 3 montre la disposition des équipements pour le système de mesure à deux paires de transducteurs.

3.1.2 Méthodes de référence

3.1.2.1 Méthode des mi-sections

Une turbine convertit la vitesse d'écoulement en fréquence de rotation de l'hélice qui tourne librement et dont un compteur peut enregistrer le nombre de rotations. Nous utilisons une mini-turbine dotée d'une hélice à deux pales métalliques, placée dans l'eau en direction opposée à l'écoulement (Figure 4). La

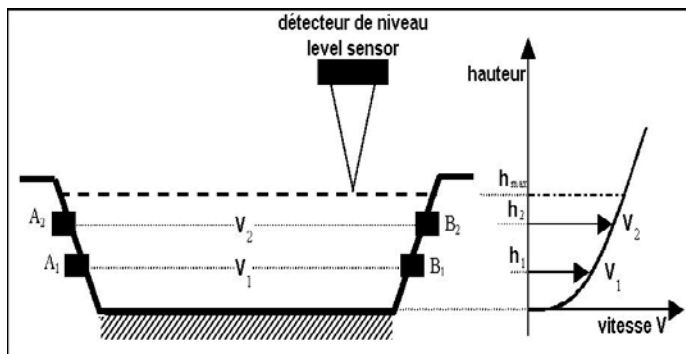


Figure 3. Positionnement des capteurs pour la mesure ultrasonique le long de deux cordes dans un canal trapézoïdal.
Position of the two ultrasonic chordal path measurements in a trapezoidal channel.

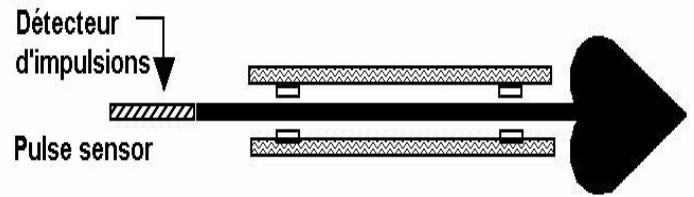


Figure 4. Schéma de l'instrument de référence pour les vitesses d'écoulement.
Schematic of the reference device used for measuring flow velocities.

fréquence n de rotation de l'hélice est fonction linéaire de la vitesse d'écoulement V au point de mesure : $V = k \cdot n + D$, où k (pas hydraulique) et D sont des caractéristiques de la turbine déterminées lors d'une phase d'étalonnage et n est obtenu par comptage d'un nombre d'impulsions N sur une durée t .

Pour notre appareil, nous avons trouvé (jaugage) :

$$V_{(m/s)} = 0.51806 \cdot n_{(tr/s)} + 0.004 \quad (11)$$

Tableau 1. Spécifications techniques du débitmètre à hélice
Table 1. Technical specifications of the propeller flowmeter

Caractéristique du débitmètre	
Vitesse minimale détectable	0,01 m/s
Vitesse maximale détectable	2,5 m/s
Précision de la mesure de vitesse	$\pm 1 \%$
Diamètre de l'hélice	40 mm
Pas de l'hélice	20 mm
Intervalle de mesure	20 sec

avec V en m/s et n en Tr/s.

En vue d'avoir un résultat précis, il faut s'assurer de mettre le capteur dans une portion aussi rectiligne que possible et d'obtenir une répartition transversale aussi régulière que possible.

La méthode des mi-sections (Figure 5) est une méthode d'intégration approchée des vitesses en vue d'obtenir le débit. La procédure consiste à découper la section droite en N sous-sections (8 par exemple) de largeur w_i et placées aux hauteurs $h'_i = \frac{1}{2}(h_i + h_{i+1})$ est la position verticale du centre de chaque sous-section et $V'_i = \frac{1}{2}(V_i + V_{i+1})$ est une estimation de la vitesse moyenne dans la sous-section (dans le cas de faibles variations temporelles du niveau, on peut limiter le nombre de mesures en assimilant la vitesse moyenne sur chaque verticale à celle mesurée à 6/10 de la profondeur à partir de la surface libre). Le débit de référence peut alors s'obtenir à partir d'une série de mesures selon :

$$Q_{ref} = \sum_{i=1}^N k_i w_i h'_i V'_i \quad (12)$$

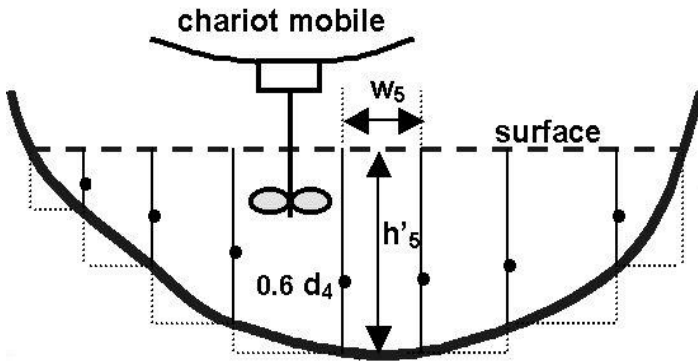


Figure 5. Méthode des mi-sous-sections pour la détermination du débit dans un canal ouvert.
Mid-section method for the determination of the flow rate in an open channel.

où k_i est le coefficient hydraulique.

3.1.2.2 Mise en œuvre pratique de la méthode, estimation de la vitesse au fond du canal et algorithme de calcul de débit de référence

Nous subdivisons la section en n sous-sections (ou tranches) verticales $i = 1, 2, \dots, n$. Sur une verticale passant au milieu de la i^{e} sous-section, nous mesurons plusieurs vitesses locales V_{ik} aux hauteurs h_{ik} , k variant de 1 à m . Les points ne sont pas forcément équidistants (Figure 6).

À proximité du fond du canal, nous estimons la vitesse à partir de l'équation de Von Karman :

$$V_{ib} / V_{id} = (h_{ib} / d_i)^{1/\alpha} \quad (13)$$

V_{ib} est la valeur extrapolée de la vitesse en un point à la distance h_{ib} du fond, sur la i^{e} verticale; V_{id} est la valeur mesurée de la vitesse à la distance d_i du fond sur la i^{e} verticale; α est un coefficient numérique empirique adimensionnel qui dépend de la nature des parois du canal, et qui peut prendre des valeurs entre 5 et 7.

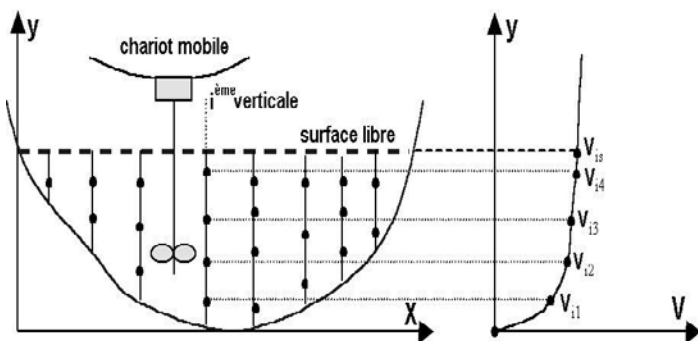


Figure 6. Position des points de mesure et distribution verticale des vitesses.
Positioning of the measurement points and vertical velocity distribution.

Le débit unitaire q_i sur la i^{e} verticale est :

$$q_i = \sum_{k=1}^{m-1} V_{ik} * \left(\frac{h_{i(k+1)} - h_{ik}}{2} \right) + \sum_{k=2}^m V_{ik} * \left(\frac{h_{ik} - h_{i(k-1)}}{2} \right) \quad (14)$$

Le débit de référence peut alors être calculé à partir de :

$$Q_{\text{ref}} = \sum_{i=1}^{n-1} q_i * \left(\frac{x_{i+1} - x_i}{2} \right) + \sum_{i=2}^n q_i * \left(\frac{x_i - x_{i-1}}{2} \right) \quad (15)$$

3.1.3 Une nouvelle méthode de placement des capteurs et de calcul du débit dans un canal ouvert

Les composantes non longitudinales du champ de vitesses, causées par des perturbations, altèrent les temps de transit entre détecteurs. Pour réduire les incertitudes sur le profil de vitesse et atteindre une précision élevée, même dans des conditions hydrauliques défavorables, une configuration multi-chemins doit être adoptée en augmentant le nombre de chemins acoustiques. La vitesse d'écoulement est alors mesurée sur plusieurs niveaux entre la surface libre et le fond du canal.

On divise la section S du canal en n sous-sections ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) horizontales aux frontières desquelles on mesure la vitesse d'écoulement par la méthode ultrasonore. Le niveau de l'eau est aussi mesuré par une méthode ultrasonore, ce qui permet de connaître la section mouillée (Figure 7).

Un avantage important de la mesure multi-canal est la redondance qui autorise le débitmètre à fonctionner (en mode dégradé) même en cas de défaillance de l'un des transducteurs.

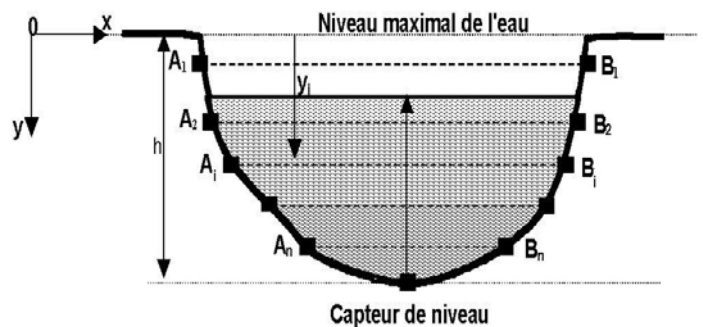


Figure 7. Mesure multi-chemin dans un canal à l'air libre.
Multi-path measurement in an open channel.

3.1.3.1 Contribution au calcul du débit en écoulement à l'air libre et exploitation des résultats

L'expression analytique du débit contient l'équation intégrale suivante :

$$Q = \iint_S V(x, y) dx dy = \int_0^h \left[\int_{x_1(y)}^{x_2(y)} V(x, y) dx \right] \bullet dy \quad (16)$$

$$= \int_0^h \bar{V}(y) L(y) dy$$

où : $L(y) = x_2(y) - x_1(y)$.

Nous mesurons $\bar{V}(y_i)$ sur n cordes aux cotes y_i (Figure 8), il vient alors :

$$Q = \int_0^h \bar{V}(y) L(y) dy \quad (17)$$

Cette intégrale peut être calculée numériquement par des techniques d'intégration numériques quadratiques de type Gauss-Legendre. Ces techniques remplacent l'intégrale par une sommation discrète utilisant les ordonnées de la fonction à des abscisses successives, avec des pondérations appropriées, résultant de la décomposition de la fonction en polynômes de Legendre. La précision de la méthode dépend du nombre de points connus et de la nature de la fonction à intégrer; l'expérience a montré qu'une sommation utilisant 8 à 20 points de mesure fournit une précision suffisante.

L'expression du débit lorsque le niveau d'eau dans le canal est constant est constant

$$Q = \frac{h}{2} \sum_{i=1}^n w_i L(y_i) \bar{V}(y_i); \text{ ou } y_i = \frac{h}{2} (1 + r_i) \quad (18)$$

où r_i est le i^{e} zéro du polynôme de Legendre.

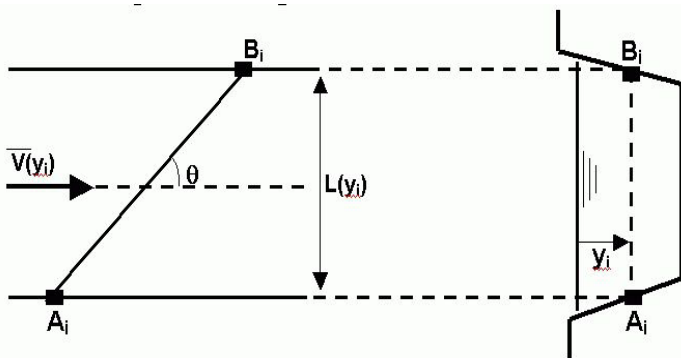


Figure 8. Calcul du débit en écoulement à l'air libre avec chemin unique de mesure.
Calculation of the flow rate in an open channel with a single pair of sensors.

Lorsque le niveau d'eau dans le canal est variable, alors nous préconisons de limiter la méthode numérique quadratique à la portion de l'écoulement qui reste toujours en dessous d'un niveau minimal h_{\min} . L'intervalle d'intégration gaussienne est donc $[0, h_{\min}]$, et nous mesurons $\bar{V}(y_i)$ sur cet intervalle. Par ailleurs, nous proposons d'améliorer la précision des mesures en plaçant une ou deux cordes de mesure supplémentaires au milieu de l'intervalle situé entre le niveau minimal h_{\min} et le niveau nominal atteint par le liquide.

Nous supposons un profil de vitesse logarithmique :

$$\frac{V}{V_0} = \frac{1 + 1,77 \sqrt{C_f \ln\left(\frac{y}{h}\right)}}{1 - 1,77 \sqrt{C_f}} \quad (19)$$

dans lequel le coefficient de friction $C_f \cong 0,0016$ et que l'eau peut subir des fluctuations de $\pm 5\%$ de son niveau nominal.

Nous utilisons une intégration de Gauss suivant trois cordes ($n = 3$) et l'intervalle gaussien sera tel que $y/h \leq 0,80$. La corde de mesure auxiliaire sera alors placée à $y/h = 0,90$.

Les nœuds (r_i) et les poids (w_i) de la méthode quadratique de Gauss-Legendre dans le cas de i variant de 1 à 3 et $n = 3$ sont donnés par :

$$\int_{x_1}^{x_2} V(x) \bullet dx = \frac{x_2 - x_1}{2} \int_{-1}^{+1} V(t) \bullet dt;$$

$$\bar{V} = \int_{-1}^{+1} V(t) \bullet dt \cong \sum_{i=1}^n w_i \bullet V_i \quad (20)$$

Cette formule est exacte pour tout polynôme défini sur $[-1, 1]$ et de degré inférieur à $2n - 1 = 5$.

On écrit l'approximation polynomiale :

$$V(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (21)$$

$$\text{d'où : } = 2a_0 + 2a_2/3 + 2a_4/5 = w_1 V_1 + w_2 V_2 + w_3 V_3$$

et $V_i = a_0 + a_1 r_i + a_2 r_i^2 + a_3 r_i^3 + a_4 r_i^4 + a_5 r_i^5$ pour i variant de 1 à 3.

En identifiant les coefficients, on obtient le système suivant :

$$\begin{aligned}
w_1 + w_2 + w_3 &= 2 \\
w_1 r_1 + w_2 r_2 + w_3 r_3 &= 0 \\
w_1 r_1^2 + w_2 r_2^2 + w_3 r_3^2 &= 2/3 \\
w_1 r_1^3 + w_2 r_2^3 + w_3 r_3^3 &= 0 \\
w_1 r_1^4 + w_2 r_2^4 + w_3 r_3^4 &= 2/5 \\
w_1 r_1^5 + w_2 r_2^5 + w_3 r_3^5 &= 0
\end{aligned} \quad (22)$$

La solution numérique de ce système est :

$$w_1 = w_3 = 5/9; \quad w_2 = 8/9$$

$$r_1 = -\sqrt{\frac{3}{5}} = -0,774559667; \quad r_2 = 0; \quad r_3 = +\sqrt{\frac{3}{5}} = +0,774559667 \quad (23)$$

Dans ce qui suit, nous allons calculer le débit normalisé q avec cette nouvelle méthode, lorsque le niveau d'eau subit des variations de ± 5 % sa valeur nominale. Dans chaque cas, le débit normalisé est calculé comme la somme de l'intégrale gaussienne q_{gauss} et de la contribution auxiliaire q_{aux} (Tableau 2).

Ces résultats montrent que la méthode peut être appliquée efficacement pour calculer le débit dans des canaux ouverts avec une précision accrue.

Les résultats des mesures expérimentales sont illustrés ci-dessous dans les graphes de l'erreur relative $(V - V_{\text{ref}}) / V_{\text{ref}}$, où V est la vitesse du fluide indiquée par le débitmètre ultrasonore et V_{ref} est la valeur de débit enregistrée par le capteur de référence. Le débitmètre présente une incertitude de $\pm 2,05$ % du débit effectif dans le cas d'une mesure mono-canal et de $\pm 0,96$ % dans le cas d'une mesure bi-canaux. Les erreurs les plus importantes se situent dans la zone des faibles vitesses de fluide. La performance est bonne et dépasse les méthodes classiques. La comparaison des deux graphes met en évidence l'intérêt d'un canal supplémentaire de mesure pour augmenter la précision de la mesure ainsi que l'insensibilité aux variations de profil (Figure 9).

Dans une configuration mono-canal, il faut définir la distribution verticale des vitesses avec beaucoup de soin si l'on veut atteindre une bonne précision. Dans une configuration multi-canaux, la vitesse sur la ligne médiane est bien définie, mais il faut choisir avec soin la méthode d'intégration. La fiabilité de la vitesse mesurée le long d'une corde dépend de la longueur du chemin, de la configuration et de la position radiale du chemin acoustique, de la forme de l'impulsion acoustique et de la synchronisation de l'électronique.

4. CONCLUSION

Les débitmètres ultrasonores sont à même de réduire de façon notable les coûts d'installation et de fonctionnement des stations de surveillance tout en fournissant un degré de précision conforme ou supérieur aux équipements de mesure traditionnels (vortex, pression différentielle, orifices, buses, venturi, tubes de Pitot, flux magnétique, etc.). La méthode proposée à détection de temps de transit donne une mesure fiable et précise des débits en canaux ouverts avec une incertitude ne dépassant pas 2 % pour la technique de mesure dite mono-canal et de 1 % seulement pour la mesure bi-canaux.

Le débitmètre proposé a été conçu en tant que capteur intelligent c'est-à-dire intégrant toutes les fonctions de traitement du signal et de transmission des données, il promet ainsi une réduction des coûts d'entretien et une information riche, incluant l'auto-diagnostic de la chaîne d'acquisition. Il se présente donc comme un maillon indispensable pour une gestion optimale des systèmes d'irrigation à grande échelle.

Ces premiers résultats sont donc encourageants concernant l'avenir de l'appareil, toutefois des essais ultérieurs restent à faire pour déterminer plus en détail les performances de l'instrument en matière de précision, de répétabilité, de linéarité, de fiabilité et de temps de réponse.

Tableau 2. Résultat du calcul du débit normalisé à niveau d'eau variable.
Table 2. Calculation of the unit flow rate (q) at various water levels.

Niveau/Niveau nominal	q_{gauss}	q_{aux}	Q_{tot}	$\Delta q/q$
100 %	0,8187	0,1923	1,0089	+ 0,8 9%
95 %	0,8596	0,1518	1,011	+ 1,10 %
105 %	0,7777	0,2289	1,0066	+ 0,66 %

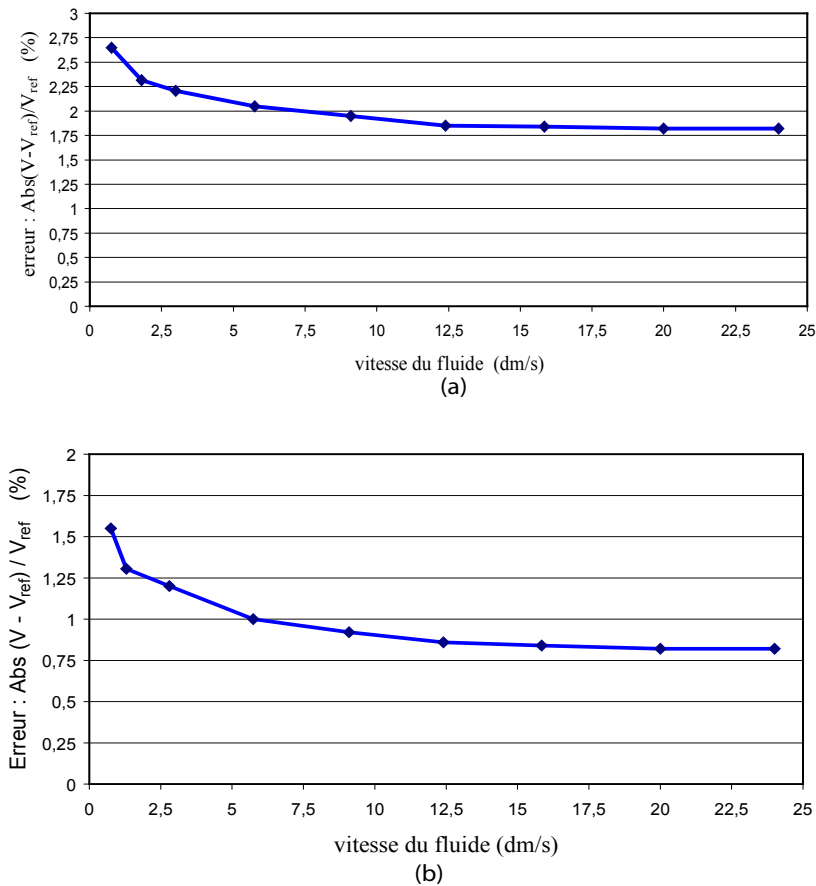


Figure 9. Performances du débitmètre ultrasonore : chemin (a) simple; (b) double.
Performance of the ultrasonic flow meter: (a) single channel; (b) dual channel.

5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AMERICAN GAS ASSOCIATION (1996). *Ultrasonic flow measurement for natural gas applications*. A.G.A. Engineering technical note M-96-2-3, The ultrasonic metering task group of the operating section transmission measurement committee, Arlington, VA, États-Unis, March 1996.

BARMTTLER M. et P. GRUBER (1992). Anwendung von Oversampling-Verfahren zur Erhöhung der Auflösung digital erfaßter Signale, *Technisches Messen*, 59, 21-25, 69-75, 262-268, 312-319.

BERANEK L.L. (1972). *Acoustic properties of gases*, American Institute of Physics Handbook, 3rd Ed., McGRAW-HILL., New York, NY, États-Unis.

BRIGNELL, J.E. et N.M. WHITE (1994). *Intelligent sensor systems*. INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING., Bristol, Royaume-Uni, 256 p.

BRIGNELL J.E. et N.M. WHITE (1984). *Intelligent sensor systems*, IOP PUBLICATIONS, Bristol, Royaume-Uni, 203 p.

DRENTHEN J.G. (1995). The Q.sonic ultrasonic gas flowmeter for custody transfer. *Third International Symposium on Fluid Flow Measurement*, San Antonio, Texas, États-Unis, March 19-22, 1995.

DROST C.J. (1980). *Volume flow measurement system*. Brevet américain N° 4,227,407.

- FREUND W.R. JR. et K.L. WARNER (1995). Performance characteristics of transit time ultrasonic flowmeters. *Third International Symposium on Fluid Flow Measurement*, San Antonio, TX, États-Unis, March 19-22, 1995.
- GENTHE W.K. et M. YAMAMOTO (1974). *A new ultrasonic flowmeter for flows in large conduits and open channels*. Flow – its measurement and control in science and industry, 1 (part 2), R.B. DOWDELL (Éditeur), ISA: 947-955.
- HILL J.A. et J.P. PELL (2000). *Flow measurement system with guided signal launched in lowest mode*. Brevet américain N° 6,065,350.
- LYNNWORTH, L.C. (1989). *Ultrasonic measurements for process control: Theory, technique, applications*, Academic Press, San Diego, CA, États-Unis.
- MULTON F. (1994). Measurement of flow by ultrasonic method. The hydro-electric power, *Houil Blanc.*, 49-7, 33-35.
- SZABO T.L. (1995). Causal theories and data for acoustic attenuation obeying a frequency power law. *J. Acoust. Soc. Am.* 97, 14-24.
- TANER A.H. et J.E. BRIGNELL (1995). Aspects of intelligent sensor reconfiguration. *Sensors and Actuators A, Phys.*, 47, 525-529.
- VAN DELLEN K. (1996). *Multipath ultrasonic gas flow meters*, Daniel Industries, VA, États-Unis.
- WHITE, N.M. (1988). Surface elastic waves. *Proc. IEEE*, 58, 1238-1275.
- ZIANI M., M. BENNOUNA et P. BOISSIER (2001a). Decentralized approach of production using intelligent sensor. *International conference 3rd workshop on European scientific and industrial collaboration (WESIC'2001)*, Ensched, Pays-Bas, 27-29 juin 2001.
- ZIANI M., M. BENNOUNA et P. BOISSIER (2001b). The smart sensor design for the production automated systems. *International Conference on Industrial Engineering Production Management (IEPM'2001)*, QC, Canada, 20-23 août 2001.
- ZIANI M., M. BENNOUNA et P. BOISSIER (2002). Ultrasonic smart sensor new application and case study. *6th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI'2002)*, 14-18 juillet 2002, Orlando, FL, États-Unis.